

路桥结构理论与工程系列丛书

水泥混凝土路面 板下脱空封堵

设计理论与处治技术

赵茂才 著

哈尔滨工业大学出版社

路桥结构理论与工程系列丛书

水泥混凝土路面板下 脱空封堵设计理论与处治技术

赵茂才 著

哈尔滨工业大学出版社

2003

内 容 简 介

本书系统介绍了水泥混凝土路面板下脱空封堵设计理论及处治技术。内容包括:板下脱空程度分级,定量地论述了脱空对水泥混凝土路面板的危害,水泥混凝土路面板下脱空的成因、探测方法、脱空标准的确定及板下脱空处治的设计理论和方法。

本书包括了大量的最新科研成果和工程实践经验,内容丰富,叙述简明,可供从事道路工程养护、科研、教学和工程设计人员参考使用,也可作为相关专业研究生教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水泥混凝土路面板下脱空封堵设计理论与处治技术/赵茂才著.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.6

ISBN 7-5603-1897-5

I. 水… II. 赵… III. 水泥混凝土路面—路面养生
IV. U418.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 043714 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451—86414749

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 850×1 168 1/32 印张 4.625 字数 126 千字

版 次 2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1897-5/TU·41

印 数 1~2 000

定 价 10.00 元

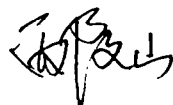
序 言

改革开放以来,随着我国国民经济的迅速发展,我国公路建设也取得了令人瞩目的成就。路面是高等级公路的重要组成部分,作为道路与车轮直接接触的“界面”,具有重要的意义。水泥混凝土路面是高等级路面的主要类型之一,截止到2002年底,在我国其建设里程已超过12万公里。

随着新建水泥混凝土路面的陆续通车,近几年通过行车实践表明,由于水泥混凝土路面板下脱空而引起的早期断板、错台及桥头搭板断裂、塌陷等病害越来越严重,给公路管养部门带来了巨大的经济损失和技术困难。因此,通过对水泥混凝土路面板下脱空的治理、加固来预防水泥混凝土路面板的早期断裂的产生是当务之急。

作者将承担的并于2003年1月通过鉴定的黑龙江省交通厅科研项目《水泥混凝土路面板下封堵技术的研究》的研究成果总结成书,系统地论述了水泥混凝土路面板下脱空处治的设计理论与方法。本书的出版,必将对我国水泥混凝土路面的建设、维修与养护及提高路面的使用质量、延长使用寿命起到积极的指导作用,并具有重要的长远意义。

感谢哈尔滨工业大学出版社组织出版本书。愿本书的出版对新技术的应用和水泥混凝土路面行车路况的改善起到积极的推动作用。



2003年5月22日

前 言

随着我国经济建设的迅速发展，公路运输事业突飞猛进，高等级公路里程快速增长，同时由于高速、重载交通比重的增加，对高等级公路路面的使用性能提出了更高的要求。我国针对优质路用沥青的不足和水泥资源相对丰富，将水泥混凝土路面应用于高等级公路是我国公路发展的一个重要策略。最新资料表明，截止到 2002 年底，我国水泥混凝土路面总里程达 12 万公里。

但是，20 世纪 90 年代后，随着水泥混凝土路面建设里程的增加和使用年限的增长，由板下脱空引起的早期断板、错台及桥头搭板断裂、塌陷等病害越来越严重，对其的养护治理极为困难，成为公路管养部门的一大难题。据此预测，我国现已建成投入使用的水泥混凝土路面已经或很快将进入大规模路况严重恶化期和大规模投资改造期。我国公路管养部门将面临着极其艰巨的任务，并迫切需要一个能有效延缓和预防完整水泥混凝土路面板产生早期断裂破损的养护方法。

水泥混凝土路面在使用过程中由于唧泥、重载、超载车辆的作用、旧水泥混凝土路面加宽、路基和路堤不均匀沉降、冰冻的影响及近桥涵段填土压实不足等原因，都会产生板下脱空的问题。水泥混凝土路面板下脱空的产生，改变了水泥混凝土路面板的受力状态，是造成水泥混凝土路面板产生早期断裂的主要原因之一。

《水泥混凝土路面板下脱空封堵设计理论与处治技术》是作者攻读博士学位及博士后期间的研究和施工实践工作的总结。书中系统介绍了水泥混凝土路面板下脱空的成因、危害、探测、脱空标准的确定及处治技术的设计理论和方法。

在本书出版之际，请允许著者对哈尔滨工业大学土木工程学院的欧进萍教授、原工作在中国地震局工程力学研究所（现工作在哈尔滨工业大学土木工程学院）的陶夏新教授和哈尔滨工业大学交通学院的邴文山教授的悉心指导、黑龙江省政府博士后基金的资助、哈尔滨工业大学出版社各级领导的支持和关怀表示衷心的感谢！

本书是国内第一部系统论述水泥混凝土路面板下脱空处治的设计理论与方法的书籍，可供从事道路工程养护、科研、教学和工程设计人员参考使用，也可作为相关专业研究生教材或学习参考书。希望本书对我国水泥混凝土路面的长期有效使用起到积极作用。

限于作者的水平，书中难免会有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

赵茂才

2003年4月于哈尔滨工业大学

目 录

第一章	水泥混凝土路面的结构特性和病害类型	1
第一节	概述	1
第二节	水泥混凝土路面结构与力学特性	6
第三节	水泥混凝土路面设计方法	18
第四节	水泥混凝土路面使用过程中出现的病害	20
第五节	水泥混凝土路面的病害类型和分级	25
	参考文献	27
第二章	水泥混凝土路面板下脱空的产生原因	29
第一节	概述	29
第二节	车辆荷载作用产生的影响	30
第三节	旧水泥混凝土路面加宽扩建的影响	32
第四节	路基的不均匀沉降变形的影响	36
第五节	冰冻作用的影响	41
第六节	唧泥现象的影响	44
第七节	近桥涵段填土压实不足的影响	46
	参考文献	47
第三章	水泥混凝土路面板下脱空的检测方法 及脱空区分布规律	49
第一节	检测方法概述	49
第二节	贝克曼梁式弯沉仪应用于水泥混凝土 路面板下脱空检测	55
第三节	水泥混凝土路面板下脱空形态特征	63

第四节 公路探地雷达用于桥头搭板下脱空探查·····	68
第五节 脱空区分布特征统计分析·····	72
参考文献·····	74

第四章 板下脱空对水泥混凝土路面板疲劳

寿命的影响分析·····	76
第一节 概述·····	76
第二节 均匀支撑水泥混凝土路面板的疲劳寿命特征···	78
第三节 脱空路面板最大弯拉应力的简化计算·····	80
第四节 脱空路面板疲劳寿命的计算与分析·····	94
第五节 纵向断裂水泥混凝土路面板相对高程特征·····	99
参考文献·····	101

第五章 水泥混凝土路面板下脱空的处治技术····· 103

第一节 概述·····	103
第二节 水泥混凝土路面板下脱空的分级·····	105
第三节 脱空水泥混凝土路面板下封堵的设计·····	107
第四节 脱空水泥混凝土路面板下封堵施工工艺·····	121
第五节 脱空桥头搭板及明涵台背下封堵施工工艺···	131
参考文献·····	136

作者简介·····	138
-----------	-----

第一章 水泥混凝土路面的结构特性 和病害类型

第一节 概 述

一、国际上水泥混凝土路面的发展

随着全球经济的发展，交通量迅速增长，世界各国越来越重视高等级公路的建设。水泥混凝土路面(Cement Concrete Pavement)通常称为混凝土路面，属刚性路面，是高等级公路路面结构的主要类型之一，在西方高等级公路中，占有较高的比例。据报道，水泥混凝土路面在发达国家高等级公路中所占比例已达到二分之一强。例如，在美国的高速公路网中占 51%，原东德高达 90%之多。

国际上的水泥混凝土路面的发展，经历了两大发展时期。第一个时期是在 20 世纪 30~40 年代，随着汽车工业的发展，战争物资和军队的调运，客观上对路面的质量要求大大提高。这一时期，最明显的标志是德国建成的世界上第一条汽车专用高速公路使用了水泥混凝土路面结构形式。第二个时期是 20 世纪 70 年代，世界性的石油能源危机使一些主要使用沥青建造高速公路的国家，如美国、法国、原联邦德国等，认识到必须尽量减少高速公路建设对石油沥青的依赖性，以节约沥青资源和能源。这些国家在高速公路水泥混凝土路面技术上开始了新一轮的研究和开发，并从国家战略利益考虑，增加了对水泥混凝土路面的科技投入和

建设规模。

二、我国水泥混凝土路面发展概述

1. 我国水泥混凝土路面发展历史

我国第一条水泥混凝土路面是 1928 年在浙江奉化溪口镇修筑的,当时采用日本进口的水泥,至今已有 72 年历史。但是,在半封建半殖民地的旧中国,不仅其修筑的数量极少(总里程不足 30km),而且无自己的设计理论可言,只是参照西方国家的设计规范,施工技术也极其落后。

2. 我国水泥混凝土路面发展的三个阶段

纵观我国水泥混凝土路面的技术发展过程,大体可分为三个阶段:

第一阶段——1977 年以前的摸索起步阶段

1949~1966 年,我国主要借助于前苏联的建设经验和研究成果,制订了 1953 年版和 1966 年版的《水泥混凝土路面设计规范》。1966~1977 年,受“文革”的影响,水泥混凝土路面的发展极为缓慢,总铺设里程不超过 1000km。

第二阶段——1978~1985 年间的技术开发阶段

在我国 1978~1985 年的科技规划中,交通部安排了水泥混凝土路面技术的重大研究项目。以交通部公路规划设计院、同济大学为首,组织了全国大专院校、公路、市政、民航等部门的设计、施工、科研约 40 多个单位,开展了长达十年的“联合攻关”研究,取得了可喜的成果,编写了“水泥混凝土路面设计理论和参数”的研究报告,并于 1981 年 12 月通过专家鉴定。

在此基础上,以自己的研究成果为主,编制了我国第一部《水泥混凝土路面设计规范》(JTJ 012-84),随后又编制了《水泥混凝土路面施工与验收规范》(GBJ 97-87)。这些研究成果、标准和规范的建立,对发展我国水泥混凝土路面技术起了重要作用。

第三阶段——1986~2002 年间的迅猛发展阶段

其发展标志是公路水泥混凝土路面的总里程上升到数万公里，年建成水泥混凝土路面超过 1 万公里。

设计、计算理论进一步深化，在许多方面接近或达到国际先进水平。在混凝土路面板温度疲劳应力的计算等方面，甚至比某些发达国家先进，突出表现在《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTJ 012-94) 中。

水泥混凝土路面的养护、维修技术受到重视，并取得一定的实用技术成果。在“七五”“八五”连续两个五年研究计划的基础上，“九五”期间又列项开展了养护、维修技术的深入研究。

在此期间，完成的国家科委“七五”科技先导性 025 项目“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究”和国家计委“八五”85-403 项目“高等级公路水泥混凝土路面施工机械及路用材料的研究”，都取得了丰硕的成果。

3.我国水泥混凝土路面发展现状

近 20 多年来，随着我国国民经济的迅速发展，公路交通量和轴载迅速增加，车速不断提高，对路面结构的要求随之相应提高。原有公路等级已制约经济的发展，为了适应交通运输事业的发展，我国建造了大量的水泥混凝土路面。特别是交通部 1989 年推广国家科委科技工作引导性项目《我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究》成果以来，我国水泥混凝土路面修筑里程由 1988 年以前的 8 264km（平均每年修建 217km），上升到 1998 年底的 83 652km，10 年净增 75 388km，平均每年修建 7 539km，是前 38 年年平均修建里程数的近 35 倍，占高级、次高级路面的比例由 1970 年的 0.9% 上升到 1998 年底的 16.4%，详见表 1.1。在我国大力发展水泥混凝土路面，对合理利用水泥资源、提高路面质量、缓解沥青供应不足的矛盾、增加高等级路面铺筑里程、提高运输能力、加快经济发展等都具有重要意义。

水泥混凝土路面是一种刚度大(也称为刚性路面)、扩散荷载能力强、稳定性好的路面结构。世界各国对水泥混凝土路面的修筑技术一直在进行研究和总结，使得技术上日臻完善，经济上也

显示出明显优势。

20 世纪 70 年代,我国浙江、广东、江苏等省在沥青供应不足的情况下,开始较多地修筑水泥混凝土路面。有关单位较为系统地开展了水泥混凝土路面修筑技术的研究。到 80 年代,随着修筑里程的增长,实践经验的积累,科学研究的深入,水泥混凝土路面的修筑技术有了很大改进,质量不断提高。最新资料表明,截止到 2002 年底,我国水泥混凝土路面总里程超过 12 万公里。表 1.1 反映了我国水泥混凝土路面的发展历程。

表 1.1 全国 1960~1998 年水泥混凝土路面所占比重表

年份	高级、次高级路面	水泥混凝土路面	水泥混凝土路面比例
	/km	/ km	/%
1960	1 943	60	3.1
1970	22 976	200	0.9
1980	157 851	1 600	1.0
1987	216 027	6 041	2.8
1988	230 781	8 264	3.6
1989	244 453	9 193	3.8
1990	259 958	11 373	4.4
1991	279 155	15 234	5.5
1992	301 651	21 321	7.1
1993	327 306	28 049	8.5
1994	353 142	35 549	10.1
1995	386 827	46 172	11.9
1996	425 786	55 625	13.2
1997	467 490	68 740	14.7
1998	509 278	83 652	16.4

以黑龙江省为例,近年来水泥混凝土路面建设迅猛发展,已建成的 301 国道哈尔滨—绥芬河段(长 470km)、哈尔滨—大庆

高速公路（长 132.86km，其中 K0+000～K15+300 段为沥青混凝土路面）及北安—黑河和哈尔滨—同江高等级公路等，都使用了水泥混凝土路面。

总之，我国水泥混凝土路面在高等级公路网中的所占的比例呈现逐年增大之势。

但是，众所周知，随着新建水泥混凝土路面的陆续通车，近几年通过行车实践表明，由于水泥混凝土路面板下脱空而引起的早期断板、错台及桥头搭板断裂、塌陷等病害越来越严重，水泥混凝土路面板上行车路况的超前恶化给公路管养部门带来了巨大的经济损失和技术困难。

第二节 水泥混凝土路面结构与力学特性

作为刚性路面的水泥混凝土路面，混凝土路面板的弹性模量及力学强度大大高于基层和土基的相应模量和强度。其次，混凝土的抗弯强度远小于抗压强度，约为其 $1/6 \sim 1/7$ ，因此决定水泥混凝土板尺寸的强度指标是抗弯拉应力。由于混凝土板与基层或土基之间的摩擦力一般不大，刚性路面存在有接缝，所以在力学图式上把水泥混凝土路面结构看做是弹性地基板，它的分析采用板体理论，一般不用层状理论。板体理论是层状理论的简化模型。如果车轮荷载作用在板中，无论是板体理论，还是层状理论均可采用，两者将得到几乎相同的弯拉应力和应变。

混凝土路面是以水泥混凝土板作为主要承受荷载的结构层，应力在其内部沿深度消散很快，而基层承受的应力很小，起着支承作用。由于混凝土是脆性材料，其抗弯拉强度比抗压强度低得多，在车轮荷载作用下当弯拉应力超过混凝土的极限抗弯拉强度时，混凝土板便产生断裂破坏。且在车轮荷载的重复作用下，混凝土板会在低于其极限抗弯拉强度时出现破坏。此外，由于板顶面和底面的温差会使板产生温度翘曲应力，板的平面尺寸越大，翘曲应力也越大。在荷载作用下土基和基层的变形情况对混凝土板的影响很大，不均匀的基础变形会使混凝土板与基层脱空，在车轮荷载作用下板产生过大的弯拉应力而遭破坏。为使路面能够经受车轮荷载的多次重复作用，抵抗温度翘曲应力，并对地基变形有较强的适应能力，混凝土板必须具有足够的抗弯强度和厚度。考虑到混凝土路面板的厚度不到其平面尺寸的十分之一，荷载作用下板的挠度又远小于其厚度，因此，刚性路面的构造和工作状态符合薄板小挠度理论。目前的刚性路面应力分析，大多是以弹性地基上的薄板为模式。弹性地基包括温克勒（Winkler）地基、弹性均质半空间地基与弹性层状半空间地基。

一、水泥混凝土路面板力学发展简史

水泥混凝土路面经受着各种复杂的应力作用,其中包括车轮荷载引起的荷载应力,温度变化引起的温度应力以及由于湿度变化所引起的应力等。在 20 世纪初期出现水泥混凝土路面后就遇到了如何设计路面板厚度的问题。随着水泥混凝土路面广泛使用,路面荷载应力和弯沉计算一直是人们十分关注的重要研究课题。

1925 年,威斯特卡德(Westergaard H.M)教授以赫兹理论为基础,发表了混凝土路面应力分析的论文,最早提出了用于水泥混凝土路面应力分析的弹性面板的解析解。威氏方法和计算公式在后来经过几次修改补充,直到现在仍然广泛地运用在很多国家的刚性路面设计的实践中。

前苏联水泥混凝土路面建设始于 20 世纪 30 年代,1937 年第一次修筑水泥混凝土路面。1950 年以后,水泥混凝土路面建筑的规模逐渐扩大,之后,由于公路运输荷载与飞机荷载的增大,水泥混凝土路面作为机场道面在前苏联极为普遍。在大规模发展水泥混凝土路面与机场道面的同时,前苏联系统地开展了有关混凝土路面设计、施工、材料等方面的科学研究工作。许多著名的学者对于路面设计理论与方法的研究做出了卓著的贡献,舍赫捷尔(Шехтер О. Я)于 1939 年提出了弹性均质半空间地基上无限大板的应力计算与设计方法,并得到广泛应用。葛鲁布诺夫-波萨多夫(Грубнов-Посадов М. И)对弹性地板板的研究成果已成功地应用于工程设计。其他学者如库里奇茨基(Кульчицкий В. А)、什卡杜洛夫(Шекатулов Д. Р)、阿波尔诺夫(Аполлинов А. Я)等人曾对混凝土路面的设计方法、混凝土路面下土基的工作状态等开展了深入研究,形成了前苏联混凝土路面、机场道面设计理论与方法。

20 世纪 70 年代以来,我国对水泥混凝土路面的设计理论、设计方法以及设计参数进行了一系列的研究和试验。1976 年,中山

大学力学教研室利用有限元位移法分析了文克勒地基上九块铰接板的飞机轮载应力。姚祖康于 1978 年分别提出了采用有限位移法和应力杂交法分析两种地基上四边自由板的挠度和应力的报告。随后,姚祖康和王秉刚应用有限元位移法的程序计算编制了供汽车荷载应力使用的应力计算用图。朱照宏也提出了半无限地基上无限大板的反力、挠度和应力的数值解,以及双层地基上无限大板的挠度和应力的解析解。1976 年,姚炳卿等人研究了有限元位移法分析文克勒地基板的精度,并讨论了半无限地基板的有限元分析中反对称性的利用问题;邓学均和姚祖康分别探讨了相邻板具有传荷能力时采用有限元分析荷载应力的方法;邓学均分析了半无限地基板在板角受荷时地基反力不同处理方法对计算结果的影响;陈树坚等分别用样条有限元和有限差分法分析水泥混凝土路面的荷载应力,取得良好的结果。1984 年,高拥民采用三角形敏特林厚板单元的有限元位移法分析了半无限地基上斜板和开圆孔板的荷载应力。1985 年,钱国超采用不完全二次函数拟合地基反力方法分析半无限地基上板的板角荷载应力;谈至明采用了三角形赖斯纳厚板单元的有限元杂交法分析了不规则板板角和开孔板等路面异形板的荷载应力;黄卫采用有限棱柱法分析混凝土路面厚板和空心板的荷载应力。

文克勒地基假定(简称 K 地基)认为地基每单位面积上所受的的压力与地基沉陷成正比,即地基反力 $q = K\omega$, K 为地基反应模量, ω 为竖向挠度。K 地基假定认为,地基某一点的沉陷仅取决于作用于该点的压力,而和附近地基不发生任何关系,可用与板连接的一组弹簧来表征,地基受压作用正如许多彼此不相联系的弹簧受压的情况一样。实际上地基在横向上是互相牵连和互相制约的,一部分受力,相邻部位也受到影响,也发生沉陷。鉴于 K 地基假定存在的一些缺点,人们进一步提出了符合弹性体基本假设的 E 地基, E 地基假定地基为连续、均质、各向同性、完全弹性的半空间体。不同的地基假定所得出的计算方法不一样,半个世纪以来,两种地基假定的计算方法都有所发展。以 K 地基假

定为基础的计算方法应用很广，目前世界上大多数国家采用这种方法。虽然它忽略了地基的侧向联系，低估了地基的分布能力，却使计算结果偏于安全。弹性均质半空间地基假定在理论上较为严密，但计算方法过于复杂，致使计算结果有一定的局限性。考虑到土体并非完全连续的介质，实际上该假设过于夸大了地基的分布能力。

目前，除我国和前苏联外，世界上绝大多数国家的水泥混凝土路面、机场道面的设计理论、设计方法都是以 K 地基假定为基础的。国际上有影响的几种设计方法，如 AASHTO 刚性路面设计方法、PCA 设计方法以及国际民航组织的机场道面设计手册等都采用 K 地基假定。

我国学术界曾普遍认为，对于刚性路面板下有一定凝聚性的地基，K 地基假定是较粗糙的，只能得到近似解答。地基内土体或材料颗粒之间有一定的横向联系，地基表面某一点的压力必然引起周围区域内产生一定的下沉，采用 E 地基假定必然能得到更为合理的结果。但也有很多试验研究和理论计算表明 K 地基简便实用。任何一种地基模型都是以一定的假定为前提的，由于刚性路面结构的复杂性以及材料的差异性，哪种模型更为合理，主要取决于与实际状况相接近的程度。

二、威斯特卡德路面弯沉计算理论

威斯特卡德于 1925 年最先运用文克勒地基上无限大或半无限大弹性薄板假定，推导了车轮荷载作用所引起的无脱空混凝土板体最大弯沉及最大弯拉应力计算公式。经过他本人和其他学者的几次修正和理论上的不断完善，直到现在仍然在很多国家的刚性路面设计中广泛地运用。

本书主要应用威斯特卡德以地基反应模量 K 表征地基刚度的路面力学模型计算公式和 E 地基假定的三维等参 20 节点有限元法分析求解出脱空引起的水泥混凝土路面板的理论标准弯沉